

Lenka LAUSOVÁ¹, Martin KREJSA²

EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ OCELOVÉ KONSTRUKCE ZA POŽÁRU

EXPERIMENTAL TESTING OF A STEEL STRUCTURE IN FIRE

Abstrakt

Experimentální testování konstrukcí vystavených účinku vysokých teplot je velmi důležité pro potvrzení teoretických předpokladů a výpočetních postupů. V příspěvku je popsán průběh experimentu, jehož cílem bylo zkoumání staticky neurčité ocelové rámové konstrukce vystavené účinku vysoké teploty. U staticky neurčitých konstrukcí je vnějšími vazbami zabráněno, aby teplotní deformace mohly volně proběhnout a v konstrukci vznikají napětí. Cílem měření bylo určit hodnoty normálového napětí, která vznikají vlivem rostoucí teploty v konstrukci. Výsledky experimentu budou využity ke srovnávací studii s MKP výpočty a také s výsledky pokročilejších výpočetních postupů. Experiment byl proveden v tepelně technické komoře na Fakultě bezpečnostního inženýrství VŠB-TU Ostrava.

Klíčová slova

Ocelová konstrukce, zatížení požárem, požární odolnost, experiment, numerické modelování.

Abstract

Experimental testing of structures is very important to confirm theoretical assumptions and correctness of calculations or numerical modeling. This paper describes an experiment in the technical fire chamber on the FBI faculty of VŠB-TU Ostrava. There was tested a statically indeterminate steel frame under growing temperature. Some chosen places of the frame were measured by strain gages and the results will be compared with FEM solving or some other advanced calculations.

Keywords

Steel structure, fire load, fire resistance, experiment, numerical modeling.

1 ÚVOD

Experimentální testování konstrukcí vystavených účinku vysokých teplot je velmi důležité pro potvrzení teoretických předpokladů a výpočetních postupů. Výsledky z řady experimentů dílčích prvků a také z požárních zkoušek na skutečných objektech jsou nenahraditelné (např. několikaleté testování v Cardingtonu, Mokrsku v roce 2008 nebo ve Veselí n. Lužnicí v roce 2011) [1, 17].

Ocelové konstrukční prvky vystavené účinku požáru lze řešit zjednodušeně pomocí tabulek a grafů podle současně platných norem [3, 4] nebo lze použít návrhové postupy, které jsou popsány v [10, 17]. Tímto způsobem se v současné době zpravidla provádí analýza samostatných prvků konstrukce (nosník, sloup) nebo analýza přípojí. V případě analýzy části konstrukce nebo celé

¹ Ing. Lenka Lausová, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 326, e-mail: lenka.lausova@vsb.cz.

² Doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 303, e-mail: martin.krejsa@vsb.cz.

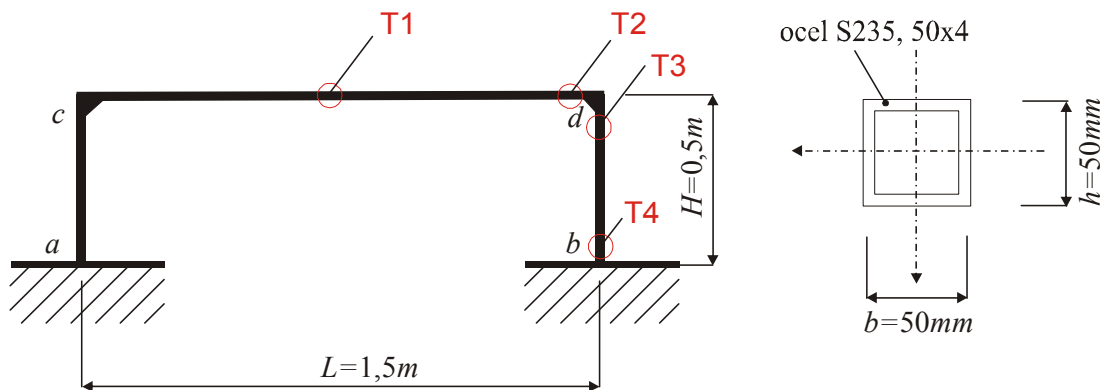
konstrukce nelze pro výpočet požární odolnosti použít zjednodušené návrhové postupy. V těchto případech je možné například využít některý z výpočetních programů (ANSYS, ABAQUS). Globální analýza části nebo celé konstrukce vystavené účinku vysoké teploty se provádí méně často, je složitější a je k ní zapotřebí větší množství vstupních údajů. Porovnání s experimenty je obzvláště v těchto případech velmi důležité [2, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16].

V tepelně technické komoře na VŠB-TU Ostrava na Fakultě bezpečnostního inženýrství je možnost testovat konstrukce zatížené vysokou teplotou. Na jaře v roce 2012 byl v komoře proveden experiment, jehož cílem bylo zatěžovat rám rostoucí teplotou a současně měřit vznikající deformace pomocí odporových tenzometrických snímačů ve vybraných místech na konstrukci. U staticky neurčitých konstrukcí je vnějšími vazbami zabráněno volnému proběhnutí teplotních deformací a v konstrukci vznikají napětí. Cílem měření bylo určit právě tyto hodnoty normálového napětí a to od rovnoměrného teplotního zatížení. Od dalšího silového zatížení bylo upuštěno z důvodu získat hodnoty napětí pouze od rostoucí teploty. Výsledky měření budou sloužit k porovnání s dalším plánovaným experimentem, kdy konstrukce bude zatížena kromě teplotního zatížení také zatížením silovým.

2 EXPERIMENT

2.1 Popis řešené konstrukce

Pro experiment byla vyrobena symetrická ocelová rámová konstrukce oboustranně vetknutá do betonového pásu viz obr.2. Rozměry rámu byly zvoleny s ohledem na omezené možnosti přepravy do tepelně technické komory. Průřez konstrukce byl navržen čtvercový uzavřený, jelikož byla snaha volbou průřezu zajistit co největší stabilitu rámu a vyhnout se např. klopení tlačенých pásnic, ke kterému dochází u otevřených profilů. Testovaná konstrukce byla bez jakékoliv protipožární ochrany z důvodu zkoumání požární odolnosti nechráněných staticky neurčitých ocelových konstrukcí ve srovnání s únosností nechráněných konstrukčních prvků. Všechna čtyři měřicí místa T1 – T4 byla zvolena z vnitřní strany rámu tak, aby bylo možno porovnávat normálová napětí na příčli i stojině. Schéma rámové konstrukce a měřicí místa lze vidět na obr.1.



Obr. 1: Schéma řešené konstrukce a měřicí místa

Pozn.: V případě dalšího plánovaného experimentu, kdy rám bude spolu s teplotou zatížen také vnějším silovým zatížením na příčli podle [13], bude v těchto vybraných měřicích místech sledován nárůst napětí z důvodu možného vzniku plastických kloubů.

2.2 Příprava tepelně technické komory

Tepelně technická komora na Fakultě bezpečnostního inženýrství VŠB-TU v Ostravě je místnost čtvercového půdorysu o straně 2,7 m a výšce 3 m. Do komory je zaveden přívod čerstvého vzduchu z prostoru mimo budovu ocelovým potrubím vnitřního průměru 200 mm. Odvod spalin z komory je proveden rovněž ocelovým potrubím vnitřního průměru 200 mm. Přívod a odvod vzduchu je možno regulovat přepážkami zabudovanými v obou potrubích. Odvod spalin je navíc

vybaven odtahovým ventilátorem s třístupňovou regulací výkonu. Ventilátor má maximální výkon $2\,200\text{ m}^3/\text{hod.}$ Navíc byl při experimentu přívod vzduchu do komory zvýšen dodatečnou instalací ventilátoru o průměru 110 mm s hodinovým výkonem 180 m^3 . Při experimentu bylo v činnosti pět propanbutanových hořáků o celkovém výkonu 234 kW viz obr.2.



Obr. 2: Testovaná konstrukce

Byla snaha dosáhnout co nejvyšší možné teploty, aby tenzometricky měřené hodnoty byly vyhodnotitelné. Z tohoto důvodu bylo třeba původní rozměry komory upravit. Velikost komory byla upravena snížením stropu s možností regulace jeho výšky a rovněž byla zmenšena šířka komory. Zkouška pak byla provedena ve zkušební komoře o rozměrech: výška $1,21\text{ m}$ a šířka $2,13\text{ m}$. Délka komory zůstala zachována v původním rozměru $2,70\text{ m}$. Přes všechny tyto úpravy se nedařilo při teplotních zkouškách dosáhnout vyšších teplot než 400 °C .

Pro zlepšení možnosti vizuálního pozorování experimentu byla zkušební komora přes boční stěnu osvětlena 500 W zdrojem světla viz obr.3.



Obr. 3: Úprava komory

Teplota ocelového rámu byla měřena pomocí plášťových termočlánků typu K průměru 1 mm . Termočlánky byly umístěny přímo na konstrukci rámu v blízkosti tenzometrů T1 – T4 viz obr.1.

Další termočlánky byly rozmístěny v komoře po její výšce, aby byla možnost sledovat hodnoty teploty plynu v prostoru komory.

Pro tenzometrická měření byly použity tenzometry 1-XC11-3/350, které jsou vhodné pro měření při nízkých teplotách. Použité snímače byly zvoleny s ohledem k předpokládané maximální teplotě 350 °C. Tenzometry byly nalepeny lepidlem, které se vytvrzuje za tepla, a poté byly pokryty krycí silikonovou pryskyřicí rovněž tvrzenou za tepla viz obr.4.



Obr. 4: Příprava tenzometrických snímačů

2.3 Popis průběhu experimentu

Při samotném experimentu se ukázalo největším problémem umístění hořáků uvnitř komory viz obr.2. Problém byl jednak v nemožnosti ovládání hořáků z venku komory a také s dodáním potřebného kyslíku k hořákům. Z toho důvodu nebylo možno dosáhnout nárůstu teploty podle normové křivky [4, 10, 17] a také vyšších hodnot teploty v komoře. Při experimentu bylo dosaženo maximální teploty na konstrukci 380 °C, měření bylo vyhodnoceno pro teplotu 330 °C (pro tuto teplotu byly relevantní výsledky z tenzometrického snímání).

3 VYHODNOCENÍ TENZOMETRICKÉHO MĚŘENÍ

Vybraná místa na nosnících byla instrumentována do tenzometrického kříže, které umožňují měření deformací ve dvou na sobě kolmých osách. Změna teploty při experimentální analýze přináší nevýhodu výskytu dalších deformací, které odpovídají teplotní roztažnosti materiálu. Tuto nevýhodu je možné eliminovat správným zapojením tenzometrů do Wheatstoneova můstku tak, že deformace vyvolaná teplotní změnou je kompenzována pomocí tenzometru, který měří v kolmém směru.

Výpočet skutečné poměrné deformace materiálu nosníku v místě měření lze určit podle následujícího vztahu:

$$\varepsilon = \varepsilon_{tot} - \varepsilon_z \quad (1)$$

kde:

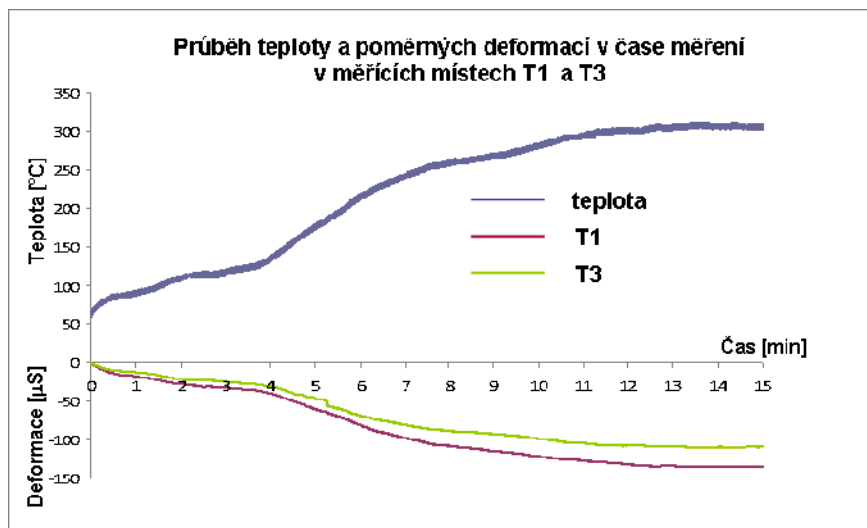
ε – skutečná poměrná deformace materiálu [-]

ε_{tot} – celková poměrná deformace měřená tenzometrem [-],

ε_z – zdánlivá poměrná deformace způsobená teplotní roztažností materiálu [-].

Ze čtyř měřených míst byla vybrána pro vyhodnocení napětí místa tenzometrů T1 a T3 (u tenzometrů T2 a T4 hodnoty naměřených poměrných deformací nebyly zcela věrohodné). Tenzometr T1 byl umístěn uprostřed příčle ve spodní části rámu, tenzometr T3 byl umístěn také z vnitřní strany rámu na stojině v rámovém rohu viz obr. 1. Pro výpočet normálových napětí byly vybrány hodnoty poměrných deformací v 15.minutě podle obr.5 a to $\varepsilon_{T1} = -133 \cdot 10^{-6}$ a $\varepsilon_{T3} = -108 \cdot 10^{-6}$ při teplotě na konstrukci 330 °C. Přepočtené hodnoty normálového napětí podle Hookeova zákona z naměřených deformací vycházejí $\sigma_{T1} = -23$ MPa a $\sigma_{T3} = -18$ MPa ve spodních vláknech průřezu.

Pozn.: V grafu na obr.5 je patrné, že teplota v čase $t = 0$ už měla hodnotu okolo 60 °C. Tato skutečnost souvisí s průběhem experimentu, kdy měření následovalo po přerušení způsobeném zhasnutím jednoho hořáku.



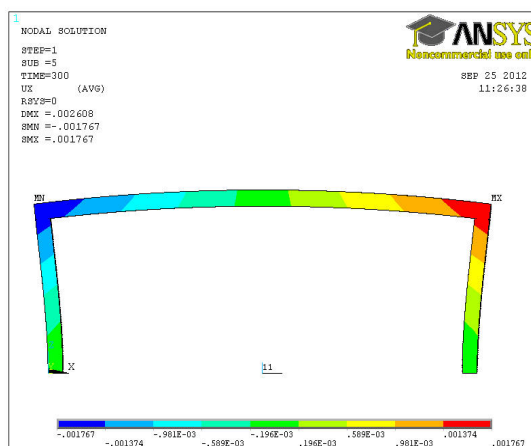
Obr. 5: Průběh teploty a poměrných deformací v měřicích místech T1 a T3 v čase t

4 SROVNÁNÍ EXPERIMENTU S MKP VÝPOČTY

Pro srovnání výsledku experimentu byl využit software ANSYS. Úloha byla řešena ve 3D a to ve dvou krocích, nejdříve byla vyřešena teplotní analýza a poté statická. Pro statickou analýzu byl použit prvek Solid 185. Jedná se o 8 uzlový prvek s lineární aproximací pole posunutí. Průběh napětí a deformace je tedy konstantní po prvku. V každém uzlu jsou definovány tři stupně volnosti (posuny u , v a w), prvek má celkem 24 stupňů volnosti. Tomuto prvku odpovídá v teplotní analýze konečný prvek Solid 70. Jedná se tedy také o 3D prvek s osmi styčníky a s jedním stupněm volnosti (teplotou) v každém styčníku. Po tloušťce průřezu byly zvoleny prvky ve dvou vrstvách. Velikost hrany prvku byla určena rozdělením výšky rámu na 80 dílků.

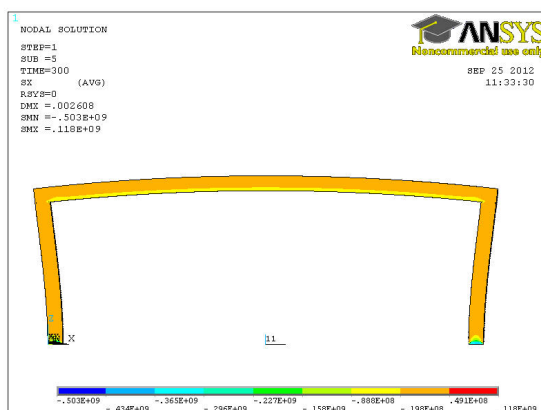
Pro teplotní úlohu v závislosti na čase byla zvolena analýza transient. Nárůst teploty v teplotní analýze odpovídal nárůstu teploty naměřené na konstrukci při experimentu podle obr.5.

Na obr. 6 je vidět rozložení deformací v ose x .



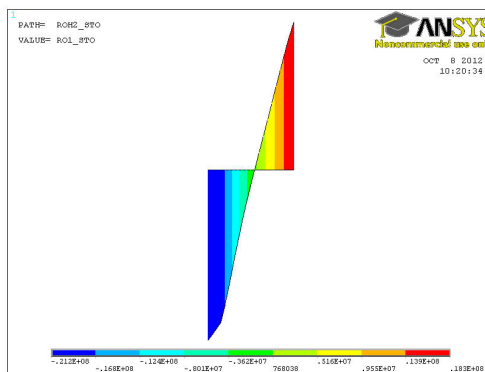
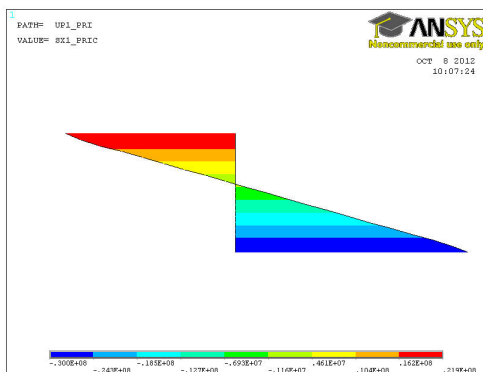
Obr. 6: Rozložení deformací v ose x

Na obr. 7 je vidět rozložení normálového napětí v ose x .



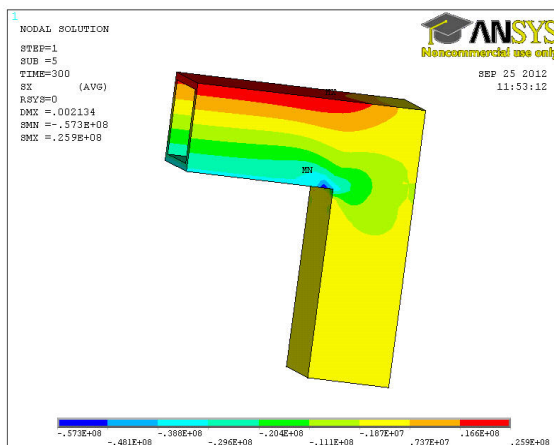
Obr. 7: Rozložení normálového napětí v ose x

Odpovídající hodnoty normálového napětí v měřících místech T1 a T3 pro teplotu 330 °C jsou $\sigma_{T1} = -30$ MPa a $\sigma_{T3} = -21$ MPa ve vnitřních krajních vlákních průřezu rámu viz obr.8, což přibližně odpovídá napětím získanými z experimentu.



Obr. 8: Průběh normálového napětí v místě T1 (vlevo) a v místě T3 (vpravo)

Rozložení normálového napětí v rámovém rohu v ose x je znázorněno na obr.9. Spodní vlákna přičle jsou tlačena, horní vlákna jsou tažena. Přesné hodnoty napětí viz obr.8.



Obr. 9: Rozložení normálového napětí v rámovém rohu v ose x

Vyhodnocená napětí v měřicích místech T1 a T3 z experimentu a numerického modelování lze najít v tabulce 1. Vyšší hodnoty tlakového normálového napětí v příčli oproti stojině je způsobeno normálovou silou, která vznikla z důvodu zabránění teplotních dilatací v místě uložení.

Tab.1: Hodnoty normálového napětí σ_x v měřicích místech T1 a T3 pro teplotu 330 °C na konstrukci

Normálové napětí ve spodních vláknech σ_x [MPa]	Měřicí místo T1	Měřicí místo T3
Experiment	-23	-18
Numerické modelování	-30	-21

5 ZÁVĚR

Na základě provedeného experimentu byla vyhodnocena závislost normálového napětí na rostoucí teplotě v příčli a ve stojině staticky neurčité rámové konstrukce. Porovnáním výsledků z experimentu a numerického modelování byla prokázána podobnost měřených a vypočtených hodnot normálových napětí ve vyhodnocených měřicích místech T1 a T3 viz tabulka 1. Rozdílné hodnoty pramení patrně z toho, že při zadávání teplotního zatížení u numerického modelování nebylo dosaženo identických podmínek jaké byly při experimentu.

Výsledky měření budou využity také k porovnání s dalšími experimenty. Další plánovaný experiment bude proveden na nově vyrobené stejné ocelové konstrukci, v tomto případě zatížené současně mechanickým zatížením a rostoucí teplotou tak, aby byl zaznamenán vznik plastických kloubů na rámu. Na základě zkušeností z provedeného měření a pro možnost porovnání bude nutné u dalšího experimentu provést tyto změny:

- přidat mechanické zatížení na rám,
- umístit ovládání hořáků vně komory,
- dosáhnout nárůstu teploty v komoře minimálně 600 °C.

Výsledky tohoto a následujícího experimentálního měření budou využity ke srovnávací studii s výsledky MKP výpočtů a s pokročilejšími výpočetními postupy, kdy výsledné hodnoty deformací a napětí na daném modelu rámu budou získány s uvážením vlivu jak fyzikální tak i geometrické nelinearity v čase požáru. Výsledky z prováděných experimentů budou tedy velmi důležité pro potvrzení nebo vyvrácení teoretických předpokladů a výpočetních postupů.

PODĚKOVÁNÍ

Projekt byl realizován za finanční podpory ze státních prostředků v rámci schváleného Specifického výzkumu. Registrační číslo projektu je SP2012/100.

LITERATURA

- [1] BEDNÁŘ, J., JÁNA, T. & WALD, F. Částečně chráněný strop při požární zkoušce ve Veselí n. L. *Konstrukce*. 2012, roč. 11, č. 4. ISSN 1803-8433.
- [2] ČAJKA, R., MATEČKOVÁ, P. & KUČERA, P. Výpočetní model staticky neurčité betonové konstrukce zatížené vysokými teplotami. In: *Betonářské Dny*. Praha: ČBS Servis, s.r.o, 2006. ISBN 80-903807-2-7.
- [3] ČSN EN 1993-1-2. *Navrhování ocelových konstrukcí: Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Praha: ČSN, 2006.
- [4] ČSN EN 1991-1-2. *Zatížení konstrukcí. Část 1-2: Obecná zatížení. Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: ČSN, 2004.

- [5] HUANG, Y., BEVANS, W.J., XIAO, H., ZHOU, Z. & CHEN, G. Experimental validation of finite element model analysis of a steel frame in simulated post-earthquake fire environments. In: *Proceedings of SPIE*. San Diego, March 2012; ISSN 0277-786X, ISBN 978-081949002-5, DOI 10.1117/12.914538.
- [6] KRÁLIK, J. & KRÁLIK, J.jr. Experimental and numerical nonlinear analysis of the fire resistance of the electrical cable support structures in NPP. In: *Modelování v mechanice 2012*, 30-31.5.2012, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, str.31-33- Sborník rozšířených abstraktů, CD-ROM ISBN 978-80-248-2694-3.
- [7] KRÁLIK, J. & KRÁLIK, J.jr. Deterministic and probability analysis of the steel frame fire resistance. In: *Modelování v mechanice 2011.*, 2-3.2.2011, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, str.19-21- Sborník rozšířených abstraktů, CD-ROM ISBN 978-80-248-2384-3.
- [8] KRÁLIK, J. & KRÁLIK, J.jr. Seismic analysis of reinforced concrete frame-wall systems considering ductility effects in accordance to Eurocode. *Engineering structures*. DEC 2009. Volume: 31 Issue: 12. Pages: 2865-2872. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.07.029.
- [9] KRÁLIK, J. & VARGA, T. Deterministic and Probabilistic Analysis of Fire Resistance of Steel Portal Frames with Tapered Members. In Safety and Reliability for Managing Risk (eds.), *European Safety and Reliability Conference (ESREL 2006)*, Date: SEP 18-22, 2006 Estoril PORTUGAL, 1-3, pp. 2081-2086. 2006.
- [10] KUČERA, P., ČESELKÁ, T. & MATEČKOVÁ, P. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. Ostrava: SPBI, 2010, 176 pp., 978-80-7385-094-4.
- [11] KUČERA, P. & POKORNÝ, J. Determination of Temperature Conditions for a Design of Engineering Construction during a Fire. *Communications 2/2011 - Scientific Letter of the University Žilina*, Volume 13, Issue 2, 2011, Pages 83-87. ISSN 1335-4205.
- [12] KUČERA, P. & MYNARZ, M. Posouzení ocelové konstrukce vícepodlažní automobilové garáže za požáru. *Časopis SPEKTRUM*, ročník 9, č. 2/2009, pages. 27 - 30. ISSN 1211-6920.
- [13] LAUSOVÁ, L. Momentová únosnost ocelové konstrukce za požáru. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava*, VŠB-TU Ostrava, 2009, Pages. 181-186. ISSN 1213-1962.
- [14] LU, J.L., DONG, Y.L. & YANG, Z.N. *Experimental study on the deformation of a two-span steel beam in a structural system subjected to fire*. Gong Cheng Li Xue, Engineering Mechanics. Volume 29, Issue 3, March 2012, Pages 110-114. Tsing Hua University. ISSN 1000-4750, DOI: CNKI:SUN:GCLX.0.2012-03-020.
- [15] QU, L., PAN, C. & LI, H. Experimental study on the fire-resistance of steel tube columns with axial compression and strong constraints. *Tumu Gongcheng Xuebao, China Civil Engineering Journal*, Volume 45, Issue 1, January 2012, pp. 42-48, ISSN: 1000131X, DOI: CNKI:SUN:TMGC.0.2012-01-009.
- [16] PERTOLD, J., XIAO, R.Y. & WALD, F. Embedded steel column bases: I. Experiments and numerical simulation. *Journal of constructional steel research*. Volume 56, Issue 3, December 2000, Pages 253–270. DOI:10.1016/S0143-974X(99)00105-4.
- [17] WALD, F. & kolektiv. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: ČVUT, 2005. 336 pp. ISBN 80-01-03157-8.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Juraj Králik, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Ing. Kučera Petr, Ph.D., Katedra požární ochrany, Fakulta bezpečnostního inženýrství, VŠB-TU Ostrava.